

М. В. Чубаров¹, А. А. Власов²

¹ Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 1, Новосибирск, 630090, Россия

² Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН
пр. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, 630090, Россия

m.chubarov@g.nsu.ru, vlasovaa@ipgg.sbras.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ МЕТОДА ЗОНДИРОВАНИЯ СТАНОВЛЕНИЕМ ПОЛЯ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ОДНОМЕРНОЙ ИНВЕРСИИ

Предложен алгоритм автоматизации построения трехмерных геоэлектрических моделей для метода зондирования становлением поля в ближней зоне на основе результатов одномерной инверсии с целью расчета синтетических сигналов для трехмерных моделей, а также ускорения получения качественной оценки полевых материалов и сведения к минимуму ошибок интерпретации. Важной частью алгоритма является автоматическое формирование трехмерных расчетных сетей, необходимых для расчета синтетических сигналов в моделях. Результаты работы алгоритма представляют собой подготовленные трехмерные модели изучаемой среды с рассчитанным синтетическим электромагнитным сигналом. Алгоритм апробирован на данных электромагнитного мониторинга последствий землетрясения, произошедшего в 2003 г. в Республике Алтай.

Ключевые слова: ВЭЗ, ЗСБ, GMSH, Modem3D, Geo3dBuilder, построение трехмерных моделей, трехмерная модель, геоэлектрическая модель, зондирование становлением поля в ближней зоне, диаграммы Вороного, CGAL, EMS, HTCCondor, Condor.

Введение

В настоящее время в области наземной геоэлектрики происходит усложнение объектов исследования, для решения научных и производственных задач недостаточно применять только одномерное моделирование сигналов становления электромагнитного поля в исследуемых средах. Причиной тому является возрастающее число необъяснимых или неверно истолкованных сигналов, в связи с чем возникла необходимость использовать более достоверный инструмент – трехмерное моделирование сигналов становления электромагнитного поля, позволяющий отслеживать влияние трехмерных эффектов.

В настоящее время уже существуют программные средства имитации сигналов в трехмерных средах – Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН использует для расчетов Modem3D [1], но остается непростой задачей построения реалистичных трехмерных моделей. Для автоматизации построения таких моделей требуется хорошее стартовое приближение, в качестве которого в работе выступает трехмерная модель для выбранного пикета, соответствующая результатам одномерного моделирования для того же пикета. Процесс построения таких трехмерных моделей итеративный и занимает много времени, а также вызывает большое количество ошибок.

Чубаров М. В., Власов А. А. Автоматизация построения трехмерных геоэлектрических моделей для метода зондирования становлением поля в ближней зоне на основе результатов одномерной инверсии // Вестн. НГУ. Серия: Информационные технологии. 2018. Т. 16, № 2. С. 104–112.

Целью работы является уменьшение времени построения сложных трехмерных моделей для метода зондирования становлением поля в ближней зоне и уменьшение ошибок построения путем автоматизации расчетов моделирования и исключения человеческого фактора.

Зондирование становлением поля в ближней зоне

Наземная электроразведка изучает геологическое строение земли, объединяя различные методы исследований объектов на основе их электрических и магнитных свойств. Сфера применения методов варьируется от поиска полезных ископаемых и картирования геологических разрезов до строительства, мониторинга дамб, а также изучения земных катастроф. На поверхности земли устанавливается аппаратура, регистрирующая изменения электрического и электромагнитного полей объектов. Полученные данные обрабатываются и интерпретируются в одномерную модель среды в каждой точке измерения.

Наиболее популярными методами наземной электроразведки являются вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ) и зондирование становлением поля в ближней зоне (ЗСБ). Исследования направлены на изучение геологических объектов, а также отслеживание их изменений в течение времени.

Метод ВЭЗ основан на измерении напряжения электрического поля, созданного путем установки разнесенных электродов, питающих это поле. Построение трехмерных моделей для данного метода было предложено в работе А. А. Сафиуллиной [2].

Другим ведущим методом наземной электроразведки является метод зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ). Установка (рис. 1) состоит из источника поля и приемников, представляющих собой незаземленные проволочные контуры, – генераторная и измерительная петли. При достаточно большом разнесении петель глубина исследования может достигать 10 км, что позволяет использовать метод при картировании местности, поиске рудных месторождений, газа и нефти, мониторинге геологических объектов.

Петли установки, используемые в исследовании, имеют форму квадрата и расположены соосно (совпадают центры координат петель). Измерительная петля находится внутри генераторной. Размеры петель зависят от размера исследуемой области. Чем больше размер генераторной петли, тем больший на нее подается ток, что напрямую влияет на увеличение глубины исследования. Кроме того, увеличение тока на генераторных петлях провоцирует увеличение количества вихревых токов Фуко, которые, в свою очередь, влияют на наводку измерительных петель. Все существующие факторы приводят к одной глобальной проблеме – недостаточной точности измерения сигналов. На генераторную петлю подается ток, затем выключается источник. В земле образуются вихревые токи Фуко, которые регистрируются измерительной петлей – зависимость напряжения от времени затухания. Полученные данные являются основой для трехмерного моделирования.

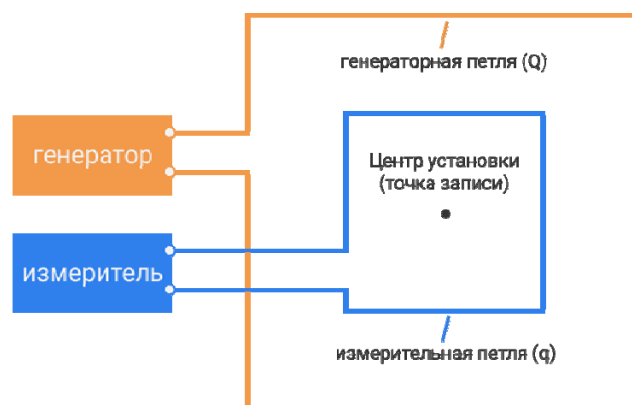


Рис. 1. Схема установки

Для метода ЗСБ предложен алгоритм автоматизации построения трехмерной расчетной сети с целью ускорения получения первого приближения моделей, сведения ошибок интерпретации к минимуму, а также расчета синтетических сигналов и их верификации.

Алгоритм построения трехмерных геоэлектрических моделей

Разработанный алгоритм для метода ЗСБ (рис. 2) является развитием алгоритма, предложенного в работе А. А. Сафиуллиной, А. А. Власова [2], и позволяет решить три принципиальные задачи: автоматическое построение первого приближения трехмерных моделей, составление для полученных моделей расчетной сети и оценка полученных результатов моделирования.

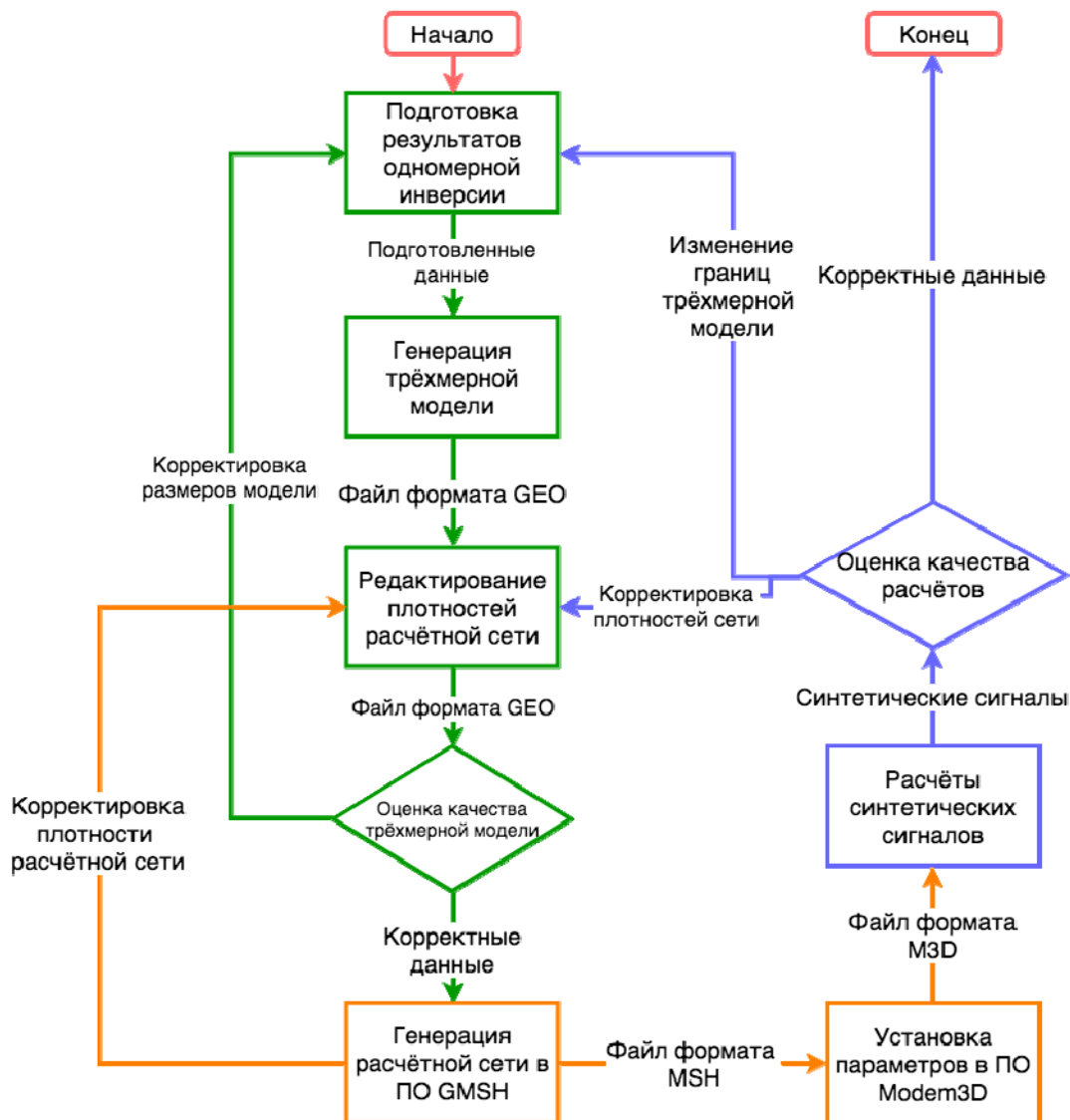


Рис. 2. Алгоритм автоматической генерации трехмерных моделей

Автоматическое построение трехмерных геоэлектрических моделей является важным этапом истолкования зарегистрированных сигналов ЗСБ, так как подготовка входных данных и построение из них трехмерных геоэлектрических моделей занимает у интерпретатора много времени. Разработанное программное средство Geo3DBuilder, использующее предложен-

ный алгоритм, позволяет уменьшить время построения геоэлектрических трехмерных моделей, а также предотвращает ошибки, появляющиеся во время их ручного создания.

Алгоритм апробирован на данных электромагнитного мониторинга последствий землетрясения, произошедшего в 2003 г. в Республике Алтай. Данные брались с установок в районе села Мухор-Тархата. обрабатывались и приводились в структурированный формат, описывающий будущую трехмерную модель.

Подготовленный файл является основой для работы алгоритма. Данные из алгоритма считываются и переводятся во внутреннее представление, на основе которого происходит автоматическая генерация трехмерных моделей. Их обрабатывает генератор трехмерных моделей, который создает двумерную модель, отбрасывая координаты z . Данная модель необходима для того, чтобы построить вокруг каждого пикета диаграммы Вороного [3] – области, ближайшие к этому пикету относительно остальных и принадлежащие ему, что позволяет облегчить дальнейшие расчеты синтетического сигнала, при этом не сильно проигрывая в точности. В работе использовались наработки библиотеки CGAL¹ – средства построения двумерных диаграмм Вороного.

Для удобства использования трехмерной модели, а также для дальнейших расчетов трехмерной сети в алгоритме используется Geo-разметка программного продукта GMSH². Программный продукт GMSH позволяет использовать готовый синтаксис описания трехмерных моделей, а также содержит в себе средства генерации двумерных и трехмерных расчетных сетей, необходимых для дальнейшего моделирования синтетического сигнала. Алгоритм сначала формирует трехмерные точки, каждой присваивается уникальный индекс и координаты (x, y, z) . Следует учесть, что точки с одинаковыми координатами объединяются в одну. Это необходимо для единой связности модели. В случае несвязности модели сигнал, проходящий в радиусе одного пикета, не зависит от сигнала другого пикета, что ничем не отличается от одномерного моделирования – моделирования, зависящего только от координат мощностей слоев. Затем из точек строятся линии, содержащие координаты начальной и конечной точек.

Полученная модель, состоящая из точек и линий, уже является трехмерной, но необходимо сформировать физические объемы, на основе которых будут производиться вычисления синтетических сигналов. Из полученных линий собираются контуры – набор линий, идущих одна за другой в определенном порядке и замыкающих друг друга. Важно учесть направление линий, так как несколько контуров могут содержать различающиеся направления, но при этом иметь общие линии. Такая задача решается добавлением отрицательного направления линии в конкретном контуре.

После получения контуров модели необходимо построить плоскости, содержащие контуры в основе, при этом учесть, что контуры могут совпадать в точности до линий, но иметь различные направления. Решение проблемы повторяющихся контуров приводит к избавлению от идентичных плоскостей и сохранению связности генерируемой модели.

Из полученных плоскостей строятся уникальные контуры объемов, содержащие набор плоскостей, затем из контуров объемов формируются логические объемы. На основе логических объемов формируются физические, необходимые для расчета синтетических сигналов в них.

Полученные трехмерные физические объемы являются финальной точкой генерации трехмерной модели (рис. 3). Время, необходимое для ручного описания геометрии трехмерной модели, содержащей 4 пикета, и подбора параметров расчетной сети, занимает от 20 часов. В свою очередь, автоматическое построение этой же модели занимает до 10 минут, что существенно экономит время и исключает ошибки при описании геометрии.

На следующем шаге полученная модель импортируется в ПО GMSH, где генерируется трехмерная расчетная сеть. Генерация производится встроенным в GMSH алгоритмом триангуляции Делоне, который позволяет создавать расчетную сеть, состоящую из тетраэдров. Плотность сети максимально высокая в центре координат исследуемого пикета и уменьшается

¹ CGAL. Software project that provides easy access to efficient and reliable geometric algorithms in the form of a C++ library. URL: <https://www.cgal.org/> (дата обращения 10.12.2017).

² GMSH. A three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. URL: <http://gmsh.info/> (дата обращения 21.11.2017).

ся в зависимости от увеличения радиуса области исследования. Рассчитывается при помощи полинома второй степени. Параметры полинома интерпретатор может редактировать на шаге создания сети. Для получения оптимальной расчетной сети рекомендуется использовать алгоритм оптимизации Netgen³, но иногда он дает сбой, так как является экспериментальным. На выходе имеется модель, состоящая из тетраэдров, которая передается на вход в программное средство расчета синтетических сигналов Modem3D.

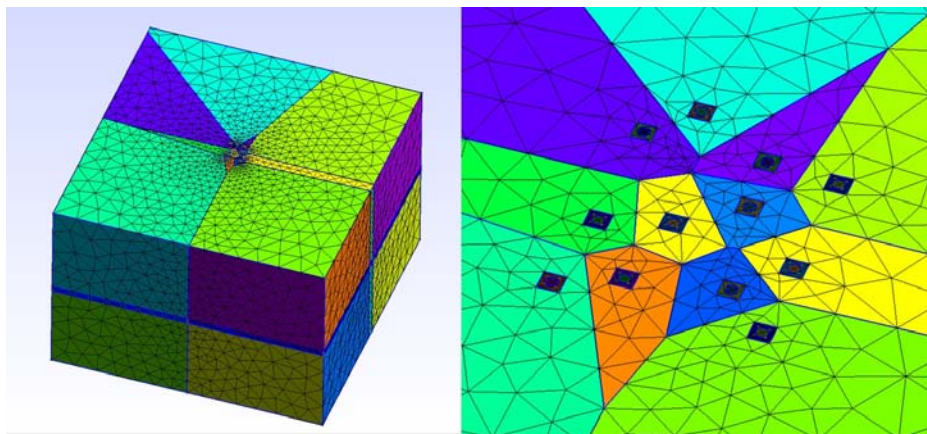


Рис. 3. Автоматически сгенерированная модель на 12 пикетов

Важной особенностью алгоритма является то, что интерпретатор на каждом шаге может изменять параметры как начальной модели, так и расчетной сети для интересующей модели. Данная особенность алгоритма обусловлена тем, что он предлагает гибкий инструментарий для получения интересующего результата.

Экспериментальные данные на 4 пикета

Генерация трехмерных моделей производилась на основе данных электромагнитного мониторинга последствий землетрясения на юго-востоке села Мухор-Тархата (рис. 4). Полигоном является участок $20\,000 \times 20\,000$ м, который содержит 4 пикета исследования. Каждый пикет представляют собой генераторную петлю размером 200×200 м и соосную измерительную петлю 100×100 м. Все петли одновитковые.

Пикеты 10, 31, 32 расположены на равнине, пикет 1 – в пойме притока реки Кокозек. Расстояние между пикетами варьируется от 500 до 1 000 м. На генераторные петли подавался ток в 1 А. В табл. 1 приведены данные одномерной инверсии для каждого исследуемого пикета.

Экспериментальные данные хорошо согласуются с синтетическим сигналом одномерных моделей в пределах метрологической погрешности измерительной аппаратуры, поэтому далее результаты трехмерного моделирования (трехмерная модель) сравниваются с синтетическими сигналами одномерного моделирования (рис. 5). Это позволяет сравнивать данные на более широком временном диапазоне и для трехмерного моделирования оценивать значения времени, при которых начинают влиять граничные условия.

³ Netgen Mesh Generator. URL: <https://sourceforge.net/p/netgen-mesher/git/ci/master/tree/> (дата обращения 27.11.2017).

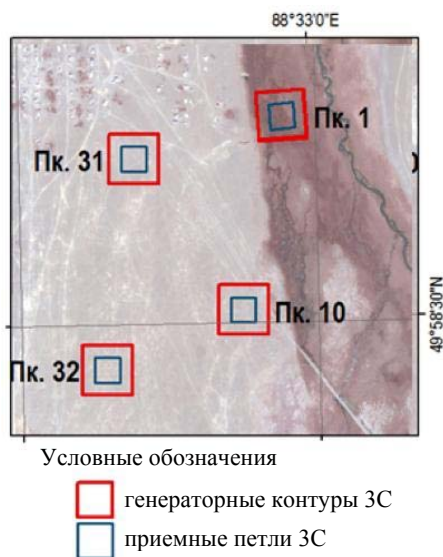


Рис. 4. Полигон Мухор-Тархата

Таблица 1

Результаты одномерной инверсии для 4 пикетов

Пикет 1		Пикет 10		Пикет 31		Пикет 32	
ρ	h	ρ	h	ρ	h	ρ	h
90	130	190	155	140	125	220	120
42	340	37	230	32	225	33	300
800		250		250		280	

Примечание: здесь и далее ρ – сопротивление (Ом), h – глубина (м).

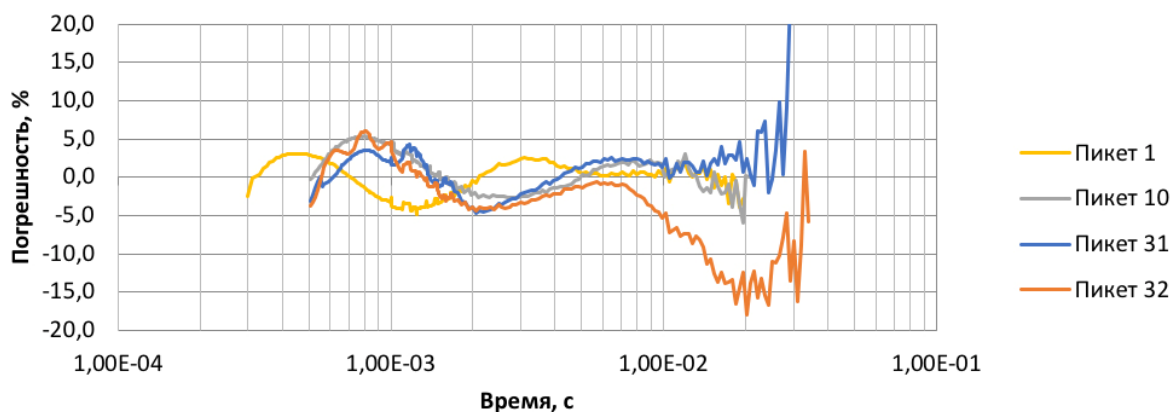


Рис. 5. Сравнение экспериментальных данных с синтетическим сигналом, вычисленным для одномерных моделей

Для генерации синтетического сигнала используется программное обеспечение Modem3D, использующее метод конечных элементов [1]. Для проверки достоверности результатов используется ПО EMS [4], которое позволяет производить моделирование синтетических сигналов ЗСБ для одномерных моделей. Расчетная сеть состояла из $\sim 1,5$ млн тетраэдров. Расчеты производились при помощи разработанного в ИНГГ СО РАН решателя для Modem3D – «MG PCG ||». Задача состояла из 10 линейных и 120 логарифмических итераций

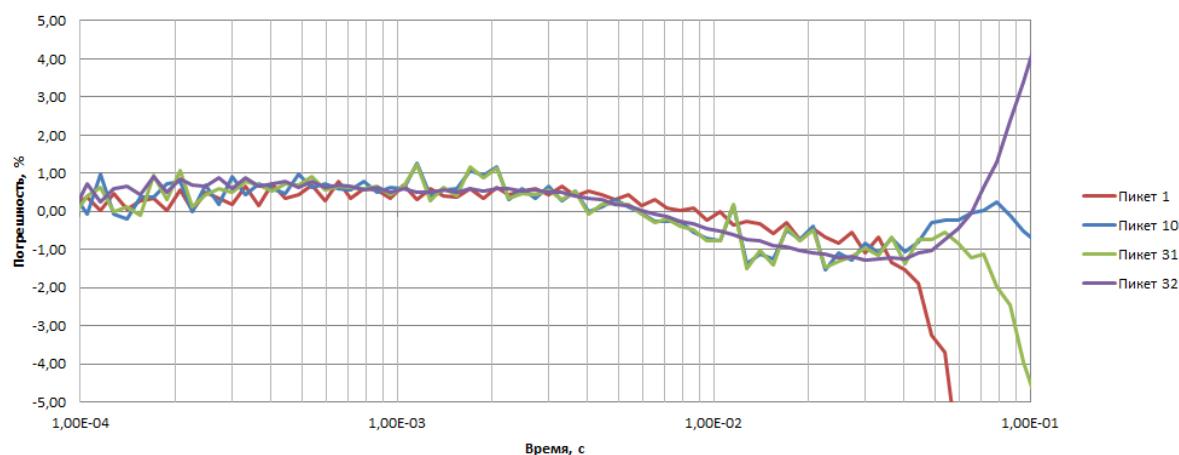


Рис. 6. Погрешности трехмерного моделирования для 4 пикетов

и решалась на ЭВМ с Intel Core i5 2-го поколения. Расчеты сигналов для каждого пикета в среднем занимали около 20 часов в двухпоточном режиме и расходовали до 2,4 GB оперативной памяти.

В результате сравнения результатов трехмерного и одномерного моделирования погрешность составила 1 % в интервале времени от 0,3 до 35 мс для одномерного моделирования в каждом пикете (рис. 6), что укладывается в метрологические характеристики измерительной аппаратуры – 5 %.

Экспериментальные данные на 12 пикетов

Для построения модели на 12 пикетов была расширена предыдущая модель на 4 пикета. В табл. 2 приведены данные одномерной инверсии для каждого исследуемого пикета.

Таблица 2

Результаты одномерной инверсии для 12 пикетов

Пикет 2		Пикет 4		Пикет 6		Пикет 11	
ρ	h	ρ	h	ρ	h	ρ	h
100	140	150	145	180	120	115	130
35	300	28	210	32	280	45	30
1500		2000		2000		2000	

Пикет 20		Пикет 21		Пикет 22		Пикет 30	
ρ	h	ρ	h	ρ	h	ρ	h
100	130	130	150	90	130	110	120
38	230	300	290	25	210	19	270
1500		2000		2000		2000	

Параметры установок и размер области исследования соответствовали модели на 4 пикета, так как имеют небольшой координатный разброс установок относительно друг друга. Модель состояла из ~2,2 млн тетраэдров. Задача решалась на той же системе 180 часов в двухпоточном режиме при расходе памяти до 6 GB. Для параллельного решения нескольких задач использовалась Grid-система HTCondor⁴, позволяющей использовать ресурсы ЭВМ, подключенных в единую локальную сеть.

⁴ HTCondor™. Specialized workload management system for compute-intensive jobs. URL: <https://research.cs.wisc.edu/htcondor/> (дата обращения 10.12.2017).

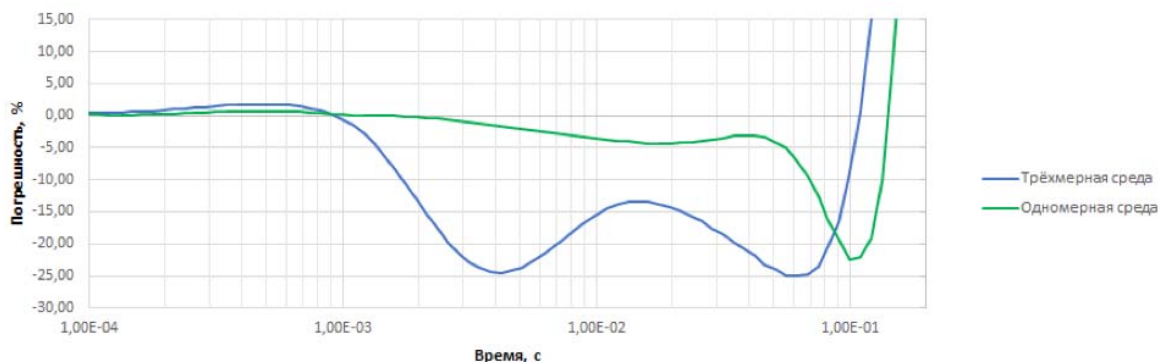


Рис. 7. Моделирование сигнала в модели на 12 пикетов

Полученные результаты (рис. 7) показывают отклонение сигнала со временем, что нельзя наблюдать при одномерном моделировании, так как плотности сеток приблизительно одинаковые как в одномерных, так и в трехмерных моделях. Расхождение сигналов объясняется влиянием параметров модели соседних пикетов. Этот факт свидетельствует о том, что неправильно подобраны одномерные модели, и необходимо их скорректировать, либо о том, что невозможно истолковать зарегистрированные сигналы в рамках одномерных моделей, – например, присутствуют наклонные границы пластов, или в пластах находятся посторонние объекты. Для корректного истолкования данных необходимо моделировать сигнал в более сложных двухмерных и трехмерных моделях.

Выводы

Разработанный алгоритм для метода зондирования становлением поля в ближней зоне позволяет в автоматическом режиме строить трехмерные геоэлектрические модели на основе результатов одномерной инверсии, тем самым ускоряя процесс получения оценки качества истолкования данных. Созданное программное средство Geo3DBuilder позволяет генерировать геометрию трехмерных моделей, а также подбор плотности расчетной сети. Интерпретатор использует Geo3DBuilder для настройки входных параметров модели, а уже в построенных моделях корректирует параметры расчетной сети. Применение алгоритма сводит к минимуму участие человека, что исключает появление ошибок интерпретатора, а также уменьшает время, необходимое на построения этих моделей.

Интерпретатор оценивает качество моделирования и подбирает параметры расчетной сети, изменяя коэффициенты полинома и размеры моделей. Кроме того, интерпретатор сам определяет, какой погрешности ему необходимо добиться и сколько он может уделить времени на расчеты.

Следующим шагом развития направления исследований будет получение моделей, более приближенных к реальным условиям. Эта цель будет достигаться путем создания моделей с наклонными границами, что позволит сделать более «плавные» переходы внутри одного пласта между пикетами.

Список литературы

1. Иванов М. И., Катешов В. А., Кремер И. А., Эпов М. И. Программное обеспечение модем 3D для интерпретации данных нестационарных зондирований с учетом эффектов вызванной поляризации // Записки Горного института. 2009. Т. 183. С. 242–245.
2. Сафиуллина А. А., Власов А. А. Автоматическое построение трехмерных геоэлектрических моделей по результатам одномерной интерпретации с помощью диаграмм Вороного // Интерэксп-по ГЕО-Сибирь: Материалы Междунар. науч. конгресса. Новосибирск, 2016. С. 18–22.

3. Карабцев С. Н., Стуколов С. В. Построение диаграммы Вороного и определение границ области в методе естественных соседей // Вычислительные технологии. 2008. Т. 13. С. 65–80.

4. Эпов М. И., Ельцов И. Н. Прямые и обратные задачи индуктивной геоэлектрики в одномерных средах. Новосибирск: Изд-во ОГГИМ СО РАН, 1992. 31 с.

Материал поступил в редколлегию 14.03.2018

M. V. Chubarov¹, A. A. Vlasov²

¹Novosibirsk State University
1 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

²Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS
1 Acad. Koptyug Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

m.chubarov@g.nsu.ru, vlasovaa@ipgg.sbras.ru

AUTOMATION OF CONSTRUCTION OF THREE-DIMENSIONAL GEOELECTRIC MODELS FOR THE METHOD OF SOUNDING THE FORMATION OF THE FIELD IN THE NEAR ZONE BASED ON THE RESULTS OF ONE-DIMENSIONAL INVERSION

The article proposes an algorithm for automating the construction of three-dimensional geoelectric models for the method of sounding the formation of the field in the near zone based on the results of one-dimensional inversion in order to calculate synthetic signals for three-dimensional models, as well as to accelerate the production of qualitative evaluation of field materials, and to minimize interpretation errors. An important part of the algorithm is the automatic generation of three-dimensional computational networks necessary for the calculation of synthetic signals in models. The results of the algorithm are prepared three-dimensional models of the studied medium with a calculated synthetic electromagnetic signal. The algorithm is tested on the data of electromagnetic monitoring of the consequences of the earthquake that occurred in 2003 in the Altai Republic.

Keywords: VES, TEM, GMSH, Modem3D, Geo3dBuilder, building three-dimensional models, three-dimensional geoelectrical model of sounding in the near zone, Voronoi diagrams, CGAL, EMS, HTCondor, Condor.

References

1. Ivanov M. I., Kartashov, V. A., Kremer I. A., Epov M. I. Software modem 3D for data interpretation of transient soundings account for the effects of induced polarization. *Journal of the Proceedings of the Mining Institute*, 2009, vol. 183, p. 242–245. (in Russ.)
2. Safiullina A. A., Vlasov A. A. Automatic construction of three-dimensional geoelectric models based on the results of one-dimensional interpretation using Voronoi diagrams. *International Scientific Congress «Interexpo GEO – Siberia»*. Novosibirsk, 2016, p. 18–22. (in Russ.)
3. Karabtsev S. N., Stukalov S. V. Construction of Voronoi diagrams and defining the boundaries of the region in the natural neighbours method. *Computational Technologies*, 2008, vol. 13, p. 65–80. (in Russ.)
4. Epov M. I., El'tsov I. N. Direct and inverse problems of geoelectrics inductive in one-dimensional environments. Novosibirsk, OIGGM SB RAS Publ., 1992, 31 p. (in Russ.)

For citation:

Chubarov M. V., Vlasov A. A. Automation of Construction of Three-Dimensional Geoelectric Models for the Method of Sounding the Formation of the Field in the Near Zone Based on the Results of One-Dimensional Inversion. *Vestnik NSU. Series: Information Technologies*, 2018, vol. 16, no. 2, p. 104–112. (in Russ.)

DOI 10.25205/1818-7900-2018-16-2-104-112